

Vpliv neelastičnega raztezka vodnikov na povese pri daljnovidih

Klemen Deželak¹, Franc Jakl¹, Robert Maruša², Jože Pihler¹, Gorazd Štumberger¹

¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

² Elektro-Slovenija, d.o.o., Hajdrihova 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: klemen.dezelak@um.si

Povzetek. V delu je prikazana problematika neelastičnih raztezkov vodnikov pri nadzemnih vodih, poznana kot lezenje (tečenje, creeping) zaradi mehanskega popuščanja materiala. Neelastično raztezanje vodnikov pri daljnovidih neposredno vpliva na povečanje povosov in posledično na zmanjšanje varnostnih višin. V referatu so podani rezultati raziskave vpliva neelastičnega raztezka na vodnikih v daljšem časovnem obdobju za tip vodnika Al/Je 490/65, ki je široko uporabljen na elektroenergetskem prenosnem sistemu 400 kV Slovenije. Podane so primerjave, če ustreznih kompenzacijskih metod ob montaži vodnikov ne upoštevamo ali upoštevamo le delno.

Ključne besede: daljnovid, neelastični raztezek, povos, temperatura

Impact of a non-elastic conductor elongation on the overhead power line conductor sags

The paper deals with the non-elastic elongation of overhead conductors known as the creep phenomenon resulting from mechanical yielding of the used material. The impact of the non-elastic conductor elongation is directly connected with the conductor sags and with smaller clearances between the conductors and the ground. Some research results and the compensation methods used for a permanent elongation of the conductors type ACSR 490/65 are presented.

Keywords: power line, non-elastic elongation, creep, temperature

1 UVOD

Pri daljnovidih, oziroma nadzemnih vodih se srečujemo s problemom neelastičnega raztezanja vodnikov, pri čemer gre za pojav mehanskega popuščanja materiala. Omenjeno je poznano pod imenom »tečenje« materiala, v starejši literaturi znano tudi pod imenom »lezenje« materiala. Tovrstne raziskave, ki so bile predmet obširnih raziskav v okviru študijske delovne skupine za vodnike mednarodne CIGRE iz Pariza, je ta pojav znan pod imenom »creeping effect« [1], [2]. Tečenje je torej pojav, pri katerem se deformacija materiala pri dolgotrajni stalni mehanski obremenitvi s časom sicer malenkostno, pa vendar nenehno povečuje [2], [3].

Na zmanjšanje trajne statične trdnosti materiala vpliva tudi povišanje temperature. S trajno statično trdnostjo materiala je mišljena tista najvišja napetost, pri kateri material pod določeno temperaturo še ne "teče". Z višanjem temperature se trdnost materiala zmanjšuje, razteznost pa povečuje. Podoben učinek se pojavi pri

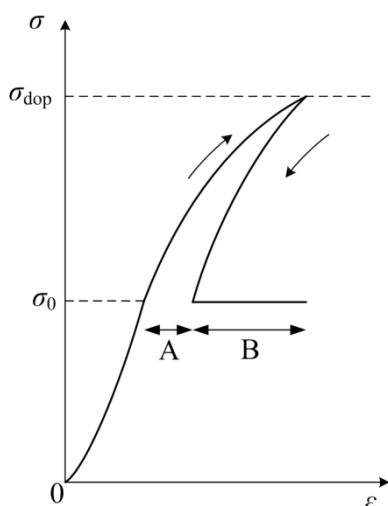
povišani mehanski trajni obremenitvi materiala oziroma vodnika [2], [3].

Posledice tečenja vodnikov se v daljšem časovnem obdobju obratovanja daljnovidov (npr. 10, 30, 50 let) odražajo v obliki povečanja povosov vodnikov in hkrati zmanjšanja varnostnih višin, oziroma varnostnih oddaljenosti vodnikov do objektov, ki so v neposredni bližini daljnovoda. Med obratovanjem daljnovoda lahko to posledično privede do neprijetnih težav, in sicer kratkega stika, škode na objektih, ogrožanja življenj ljudi, živali in podobnega [2], [3], [5] - [8].

Tečenje materiala ugotavljamo z laboratorijskimi raziskavami, in sicer s tako imenovanimi mirujočimi preizkusi, kjer se registrira deformacija materiala v funkciji časa pri neki izbrani mehanski obremenitvi in pri stalni temperaturi. Ta preizkušanja so na splošno zelo natančna in dolgotrajna. Za praktične namene običajno trajajo nekaj tisoč ur (tri do štiri mesece). Natezni obtežilni pogoji se po navadi izberejo po kriteriju EDS (Every Day Stress) s temperaturo, ki v danem trenutku vlada v laboratoriju. Dejansko pa so vodniki v vsakdanji praksi izpostavljeni različnim zunanjim vplivom (temperaturne spremembe), posledično tudi spremembam mehanskih obremenitev (poleg temperature še vplivom zimskih dodatnih obremenitev) in vplivom zaradi obratovnih dogodkov v sistemu (tokovne obremenitve oz. preobremenitve v primeru kratkih stikov-nestacionarni pogoji). Omenjenega pa seveda ni mogoče zajeti hkrati, zato se pri laboratorijskih preizkusih po navadi odločamo za že omenjeni kriterij EDS in zaradi nižjih stroškov kar laboratorijsko temperaturo zaradi dodatnega segrevanja oz. hlajenja prostora [2] - [4].

2 METALURŠKI IN GEOMETRIJSKI RAZTEZEK

Pri vodnikih je skupni trajni neelastični raztezek ε odvisen od več parametrov, ki nastopajo sočasno in je funkcija mehanske obremenitve, časa in temperature. Vsota geometrijskega ε_g in metalurškega raztezka ε_m prinaša skupni trajni neelastični raztezek ε . Slika 1 podaja principialni diagram $\sigma - \varepsilon$ (natezna napetost - raztezek) pri vodnikih pri stalni temperaturi. Pri kratkotrajnem nategu povsem novega vodnika dobimo raztezek A, ki ustreza geometrijskemu raztezku in je odvisen od natezne obremenitve. Če obremenitev traja dalj časa, nastane še dodatni raztezek B, ki pomeni metalurški raztezek ε_m . Velikost tega raztezka je odvisna od natezne obremenitve, od trajanja obremenitve in od temperature [2], [3], [9], [10].



Slika 1: Diagram $\sigma - \varepsilon$

Geometrijsko uleganje (raztezek ε_g) je povezano z zapleteno strukturo konstrukcijske sestave vodnikov in je v veliki meri odvisno od tehnologije izdelave vrvi same. Analitično je ta problem težko zajeti, pojav pa ni povsem neodvisen od časa. Za praktično uporabo lahko rečemo, da je geometrijsko uleganje (nekaj ur) kratek časovni interval v primerjavi s celotno življenjsko dobo vodnika med obratovanjem daljnovođa (npr. 50 let). Kompenzacija geometrijskega uleganja (raztezek ε_g) se v pretežni meri izvede že med samo montažo vodnikov s pomočjo ustreznih montažnih metod (s prenategom oz. s prednategom vodnikov). Pri *prenategu* (overstress) vodnike po razvlačenju napnemo z višjo natezno napetostjo od normalne (najpogosteje od 22 do 25 % natezne trdnosti). Po metodi *prednatega* (prestress) pa vodnike za krajši čas (nekaj ur, npr. od 8 do 10 ur) obremenimo z bistveno višjo natezno napetostjo (po navadi do 40 % natezne trdnosti vodnika), nakar se nateg vrvi zmanjša na vrednost normalne montažne natezne napetosti ali na σ_{EDS} . Še posebej z drugo metodo prednatega (prestress) vrvi dosežemo skoraj

popolno kompenzacijo geometrijskega uleganja (kompaktiranja) vodnika (raztezek ε_g). Zaradi tega ukrepa se nekoliko povečajo stroški pri montaži vodnikov, vendar se nekoliko večji vložek obrestuje z dolgotrajnim stabilnim delovanjem, brez problemov z varnostnimi višinami. V skladu z izsledki te raziskave bi morali investitorji razmišljati o tem, da bi zahteve po kompenzaciji neelastičnih raztezkov vgrajevali v svoje projektne naloge [2], [3].

Metalurško tečenje (raztezek ε_m) pa pomeni trajno deformacijo materiala, ki se pod vplivom natezne obremenitve vodnika odraža v obliki trajne molekularne spremembe kristalne strukture materiala. Poznavanje pričakovane velikosti metalurškega raztezka ε_m je v daljnovodni tehniki zelo pomembno. Ta neposredno vpliva na povese vodnikov med obratovanjem daljnovođa in ga računamo kar s celotno obratovalno dobo daljnovođa (50 let). Metalurški raztezek ε_m projektno upoštevamo v montažnih tabelah, pričakovani raztezek za daljše obdobje pa ustrezno kompenziramo ob montaži vodnikov s "korekcijsko temperaturo" [1, 2, 10]. Metalurško tečenje je torej pojav, ki s časom ves čas napreduje, zato ga ni mogoče v celoti odpraviti. Lahko pa ga kompenziramo za določeno obdobje, npr. za dobo eksploatacije daljnovođa. Po metodi korekcijske montažne tabele tako priredimo, da napenjamo vodnik z nekoliko večjimi silami. To pa pomeni, da pri montaži iz povestnih tabel vzamemo vrednosti, ki so za korekcijsko temperaturo manjše od dejanske. Oceno velikosti trajnega raztezka ε_m vodnika lahko določimo z obrazcem (1) [2], [3].

$$\varepsilon_m = \varepsilon_{1h} t^n \quad (1)$$

V (1) pomeni:

- ε_m ... trajni raztezek vodnika (metalurško tečenje) v $[\mu\text{m}/\text{m}]$,
- ε_{1h} ... raztezek vodnika v eni uri v $[\mu\text{m}/\text{m}]$,
- t ... skupni opazovani čas, npr. 30 ali 50 let v urah [h], in
- n ... eksponent sekundarnega tečenja vodnika v merilu log-log, ki je podan z nagibom premice $\varepsilon = f(t)$.

Enačba velja pri $\sigma = \text{konst.}$ in $\vartheta = \text{konst.}$, kar je mogoče v mejah dopustnih toleranc doseči v laboratorijskih razmerah. Enačba daje ustrezno napoved oziroma oceno velikosti metalurškega tečenja (raztezek ε_m) za določeno življenjsko dobo vodnika pri laboratorijskih razmerah.

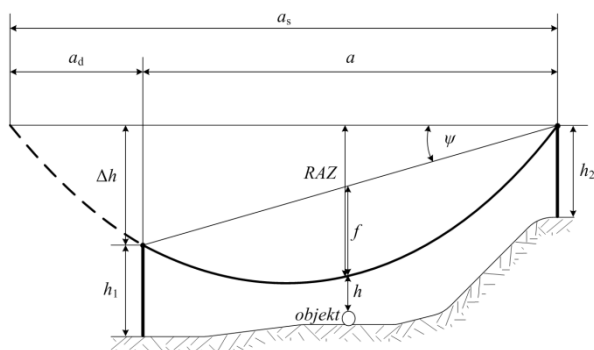
3 PRIKAZ IZRAČUNANIH VREDNOSTI

Če poznamo matematični algoritem za izračun točne vrednosti trajnega neelastičnega raztezka, ga lahko

direktno upoštevamo v montažnih tabelah, in sicer prek korekcijske temperature \mathcal{G}_{kor} . Njeno vrednost vstavimo v tako imenovano razširjeno položajno enačbo za vodnike in zaščitne vrvi v klasični diferenčni obliki. Položajna enačba opisuje spremembe stanja daljnovodnih vodnikov in zaščitnih vrvi. Profesor Milan Vidmar je v aproksimativnem obrazcu za dolžino povešenega vodnika v razpetini videl geometrijsko dolžino vrvi l_{geom} (2), kjer je a razdalja med obesiščema, p specifična teža vrvi ter σ natezna napetost. V razširjeni položajni enačbi upoštevamo torej tako temperaturni in elastični kakor tudi trajni neelastični raztezek.

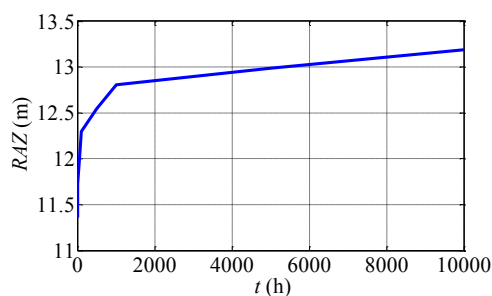
$$l_{geom} = a \left(1 + \frac{a^2 p^2}{24 \sigma^2} \right) \quad (2)$$

Izračuni so izvedeni za razpetino $a = 370$ m, pri čemer je objekt od desnega stebra oddaljen 28 m (slika 2). Prikazana je višina od temena vpetja do vodnika RAZ, poves f in varnostna razdalja do objekta pod daljnovodom h , in sicer v odvisnosti od temperature vodnika T , dopustne obremenitve σ_{dop} in tudi časa t . Korekcijska temperatura v razširjeni položajni enačbi torej je upoštevana in znaša $22,7$ °C, pri čemer so prikazani tudi rezultati brez njene upoštevanosti v položajni enačbi. Končno sta izračunana tudi največji poves in povečanje dolžine vodnika Δl brez upoštevanja korekcijske temperature.

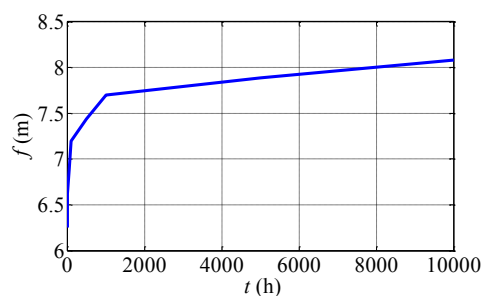


Slika 2: Prikaz obravnavanega primera (400 kV daljnovod Beričevo–Krško)

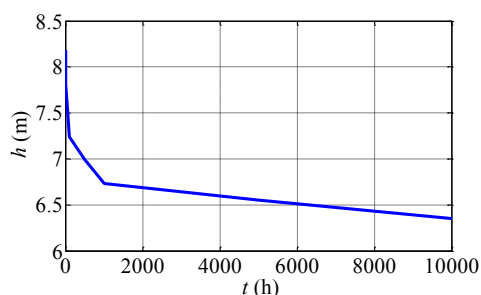
Slike 3–8 se nanašajo na raztezek ε_g oziroma na primere za njegovo odstranitev ter za različne primere njegovega neupoštevanja. Vse krivulje so izračunane za primere razdalj nad pripadajočim objektom znotraj razpetine. Pri tem smo začetno natezno napetost spremenili iz vrednosti $\sigma = 44$ N/mm² v 63 N/mm².



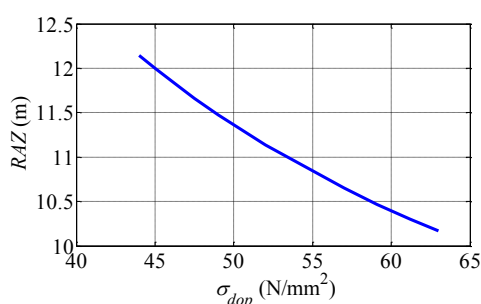
Slika 3: Višina od temena vpetja do vodnika pri začetni natezni napetosti $\sigma = 50$ N/mm²



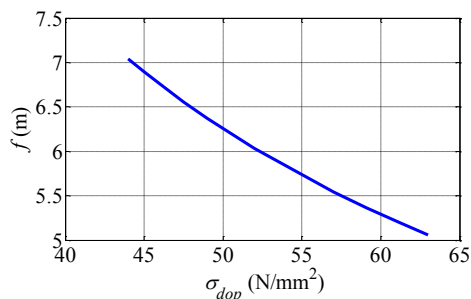
Slika 4: Poves pri začetni natezni napetosti $\sigma = 50$ N/mm²



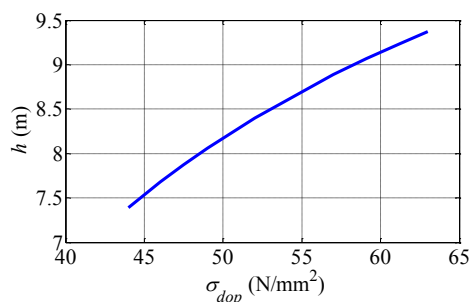
Slika 5: Varnostna razdalja do objekta pod daljnovodom pri začetni natezni napetosti $\sigma = 50$ N/mm²



Slika 6: Višina od temena vpetja do vodnika pri različnih začetnih natezih napetostih



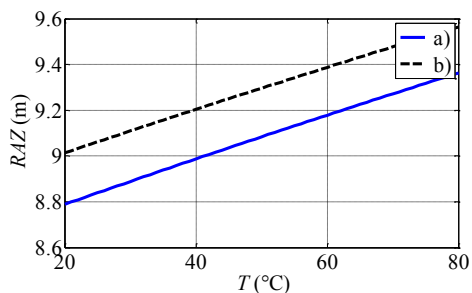
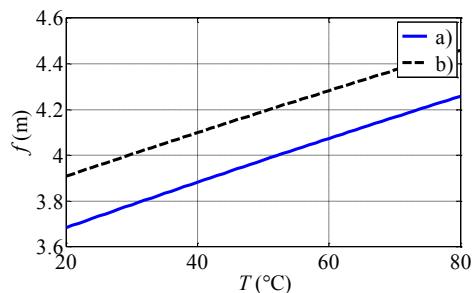
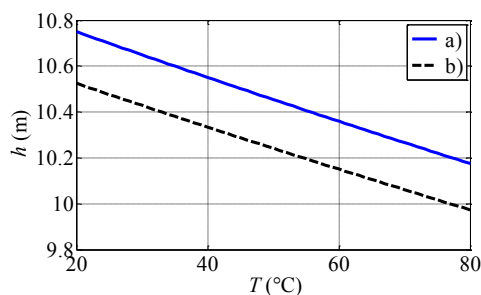
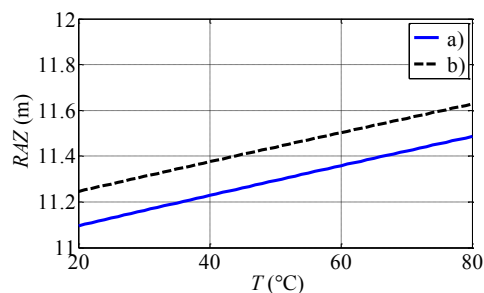
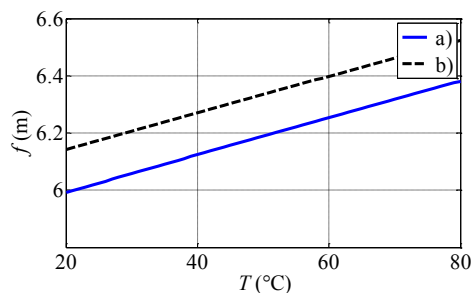
Slika 7: Poves pri različnih začetnih natezih napetostih



Slika 8: Varnostna razdalja do objekta pod daljnovodom pri različnih začetnih natezih napetostih

Kakor je razvidno iz primerjave rezultatov, se poves pri večji začetni natezni napetosti zmanjša tudi za več kakor 1 m. Do takšnih rezultatov je torej mogoče priti z upoštevanjem prednatega oziroma prenatega. Po drugi strani je iz slik 3–5 razvidno povečevanje povesov skozi čas pri začetni natezni napetosti $\sigma = 50$ N/mm². V začetni fazi je tečenje materiala precej izrazitejše kakor v nekoliko poznejši fazi.

Slike 9–17 se nanašajo na raztezek ε_m oziroma na primere za njegovo odstranitev ter tudi neupoštevanje. Vse krivulje so izračunane za primere razdalj nad pripadajočim objektom znotraj razpetine, in sicer v odvisnosti od temperature vodnika (slike 9–14) in dopustne obremenitve (slike 15–17). Poleg primerov brez upoštevanja korekcijske temperature (krivulje b) so seveda prikazani še primeri z njenim upoštevanjem (krivulje a).

Slika 9: Višina od temena vpetja do vodnika pri $\sigma_{dop} = 80$ N/mm²Slika 10: Poves pri $\sigma_{dop} = 80$ N/mm²Slika 11: Varnostna razdalja do objekta pod daljnovodom pri $\sigma_{dop} = 80$ N/mm²Slika 12: Višina od temena vpetja do vodnika pri $\sigma_{dop} = 50$ N/mm²Slika 13: Poves pri $\sigma_{dop} = 50$ N/mm²

- [8] Kopsidas, Konstantinos, Simon M. Rowland, and Boud Boumécid. "A Holistic Method for Conductor Ampacity and Sag Computation on an OHL Structure." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 27.3 (2012): 1047–1054.
- [9] F. Jakl: "Nova spoznanja neelastičnih raztezkov daljnovodnih vodnikov in zaščitnih strelvodnih vrvi". *Elektrotehniški vestnik*, 1994, 61, št. 1/2, str. 1–12.
- [10] F. Jakl: "Kompenziranje trajnega neelastičnega raztezka vodnikov in zaščitnih strelvodnih vrvi ob montaži vodnikov pri daljnovodih. *Elektrotehniški vestnik*, 1994, 61, št. 3, str. 150–155.

Klemen Deželak je diplomiral leta 2004 (visokošolski program), 2006 (univerzitetni program) in doktoriral leta 2011 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru. Zaposlen je kot asistent z doktoratom na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo tematike proizvodnje in prenosa električne energije, optimizacijskih algoritmov in delovanja trgov z električno energijo.

Franc Jakl je diplomiral leta 1962 in magistriral leta 1976 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, doktoriral pa leta 1992 na Tehniški fakulteti VTO Elektrotehnika, Računalništvo in Informatika Univerze v Mariboru. Po diplomi je bil zaposlen do leta 1965 pri Elektroprenosu v Ljubljani. V letih 1965–1990 je bil neprekinjeno zaposlen pri Dravskih elektrarnah Maribor, od leta 1991 naprej do 2003, pa pri ELES-Elektro Slovenija, sektor za razvoj in investicije v Mariboru. Njegov delokrog je bil ves čas razvojna in investicijska dejavnost na področju elektroenergetskih proizvodnih in prenosnih objektov 110, 220 in 400 kV. Od leta 1977 do upokojitve leta 2003 je sodeloval pri pedagoškem procesu na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, najprej pri predmetu "Prenosne naprave" in "Elementi elektroenergetskih sistemov", od leta 1995 pa pri predmetu "Prenos električne energije". Prof. dr. Franc Jakl je aktivni član EZS, DIT, CIGRE-CIRED, CIGRE Paris, Slovenske in ameriške sekcije IEEE/PES, ÖVE Wien, SATENE in FEANI-EUR ING. Na strokovnem področju je deloval kot dolgoletni predsednik študijskega komiteja ŠK22 za nadzemne vode SLOKO CIGRE (1993–2005) in kot član mednarodnega študijskega komiteja SC22 za nadzemne vode CIGRE Paris (1994–2002) ter več mednarodnih študijskih delovnih skupin za nadzemne vode CIGRE Paris (1992–2015).

Robert Maruša je diplomiral v letih 1992 in 1998 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru (FERI), magistriral v letu 2010 na FDSŠ in v letu 2015 doktoriral na FERI v Mariboru. Od leta 1981 je zaposlen v podjetju ELES Podlog. Deluje na področju vzdrževanja transformatorskih razdelilnih postaj, kot tudi visokonapetostnih daljnovodov, zadnjih deset let vodi Elesovo organizacijsko enoto Podlog. Je pooblaščen inženir pri Inženirski zbornici Slovenije. V okviru Eleso vodi delovno skupino za področje vzdrževanja daljnovodov.

Jože Pihler je diplomiral, magistriral in doktoriral na Univerzi v Mariboru v letih 1978, 1991 in 1995. Od leta 1988 je zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko in član IEEE, CIGRE in EZ.

Gorazd Štumberger je diplomiral (1989), magistriral (1992) in doktoriral (1996) na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Zaposlen je kot redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko. Njegovo raziskovano področje obsega prenos električne energije in modeliranje, analizo ter vodenje elementov elektroenergetskega sistema.